



## O USO DE LAMINADOS DE CFRP PRÉ-ESFORÇADOS NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

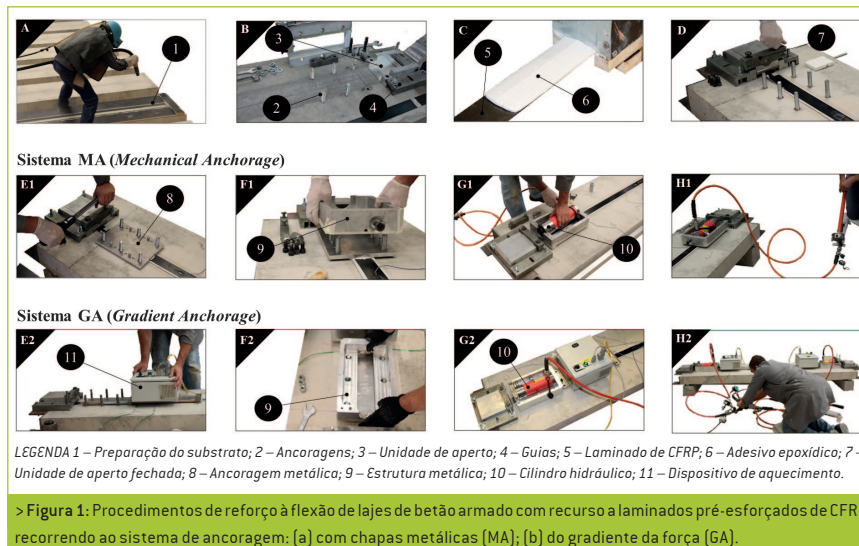
José Sena Cruz, Professor Associado, ISISE/Universidade do Minho

### 1. INTRODUÇÃO

Com o advento dos FRP (Fiber Reinforced Polymers) no reforço de estruturas de betão armado (BA), muitas técnicas foram propostas, sendo que, pela sua importância, se destacam três [1]: (i) EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), (ii) NSM (*Near Surface Mounted reinforcement*) e (iii) MF-FRP (*Mechanically Fastened FRP reinforcement*). Contudo, por razões históricas e de simplicidade de aplicação, a técnica EBR tem sido a mais usada. Qualquer uma destas técnicas pode ser aplicada de forma passiva ou ativa.

Por defeito, as técnicas ativas recorrem ao uso de FRP pré-esforçados. Em geral, o uso de FRP pré-esforçados no reforço de estruturas de BA apresenta diversas vantagens destacadas na literatura [2]. No reforço à flexão de estruturas de BA, os laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) são os mais usados por apresentarem muito baixa relaxação e fluência, sendo fixos às extremidades dos elementos a reforçar por intermédio de sistemas de ancoragem adequados. De entre os diversos sistemas de ancoragem disponíveis no mercado, os que têm tido maior aceitação/investigação são os que recorrem à fixação das extremidades do laminado por intermédio de chapas de ancoragem [MA – *Mechanical Anchorage*] ou utilizando o método do gradiente da força [GA – *Gradient Anchorage*] [3], conforme se ilustra na Fig. 1. Tipicamente, o controlo do nível de pré-esforço é realizado em extensão, sendo os níveis de extensão recomendados na literatura da ordem dos 0.4 a 0.6% [3]. Para evitar os efeitos da fluência do epóxi usado na fixação do FRP ao elemento a reforçar, recomendam-se espessuras da ordem dos 1 a 2 mm. Finalmente, será de referir que a regulamentação atual não contempla o uso de FRP pré-esforçados no reforço de estruturas.

A Universidade do Minho tem procurado dar contributos para o conhecimento destes sistemas. Estes estudos têm contado com a

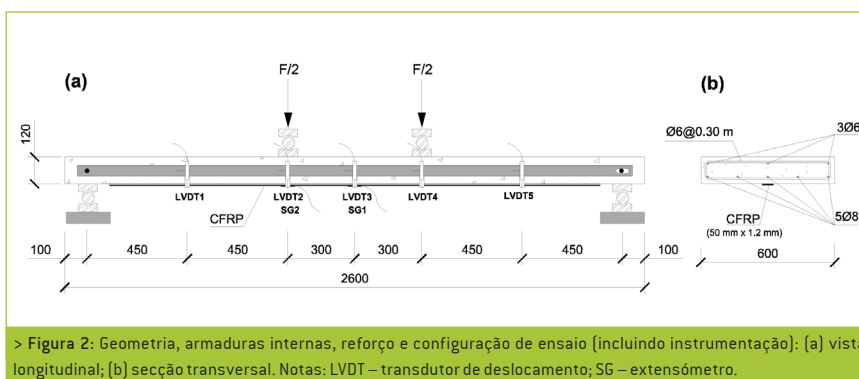


participação ativa de investigadores, entre os quais se destacam José Sena Cruz, Luís Correia e Eduardo Pereira, bem como a colaboração de outros de outras instituições, nomeadamente Julien Michels [EMPA/Suíça], Paulo França [UMa] e Paulo Costeira [IPV]. Nos parágrafos que se seguem apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos num programa experimental recentemente realizado.

### 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural dos sistemas MA e GA, bem como

a influência do tratamento da superfície para a aplicação do laminado de CFRP, foi realizada uma campanha de ensaios experimentais. Na Fig. 2 apresentam-se detalhes sobre as lajes usadas. Foram usados laminados de CFRP S&P CFK 150/2000 com secção transversal de  $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$ . Foi usado um betão da classe C30/37 e armaduras A400 NR SD. No caso das lajes pré-esforçadas foi aplicada uma pré-extensão de 0.4%. A campanha de ensaios foi constituída por 5 lajes: (i) 3 foram pré-esforçadas, 2 das quais recorrendo ao sistema MA (L50x1.2\_MA e L50x1.2\_MA\*) e 1 recorrendo ao sistema (L50x1.2\_GA); (ii) numa foi aplicado um laminado de forma pas-



siva (L50x1.2\_EBR); e, finalmente (iii) outra foi utilizada como laje de referência sem uso de reforço. Recorreu-se ao tratamento da superfície com jato de areia para todas as lajes reforçadas, com exceção da laje L50x1.2\_MA\* onde se usou esmeril. Na Fig. 3 apresentam-se os resultados obtidos em termos de força aplicada versus deslocamento a meio, enquanto que na Tabela 1 apresentam-se os principais resultados obtidos. Deste programa experimental foi possível concluir que: (i) as lajes pré-esforçadas apresentam melhor comportamento em serviço e na rotura, quando comparadas com a laje não reforçada (REF) e reforçada com um laminado aplicado de forma passiva (L50x1.2\_EBR); (ii) os sistemas MA e GA apresentam similar comportamento até à cedência das armaduras longitudinais. Contudo, devido ao facto de, no caso do sistema MA, existirem ancoragens de extremidade, é possível obter resistências últimas mais elevadas; (iii) na laje L50x1.2\_MA obteve-se a

rotura do laminado de CFRP, demonstrando que o tratamento de superfície com recurso a jato de areia é mais eficiente quando comparado com o recurso ao esmeril; (iv) à exceção da laje L50x1.2\_MA, todas as lajes reforçadas romperam por destacamento do laminado em relação ao substrato.

### 3. CONCLUSÕES

Neste trabalho destacaram-se os principais benefícios do uso de laminados de CFRP pré-esforçados no reforço de estruturas de betão armado existentes, tendo sido apresentados dois sistemas de fixação do reforço. Estes benefícios verificam-se não só na resposta da estrutura em serviço, mas também na rotura. Foi também possível demonstrar que o tratamento de superfície com recurso a jato de areia é mais eficiente do que aquele que recorre ao uso de esmeril.

### 4. AGRADECIMENTOS

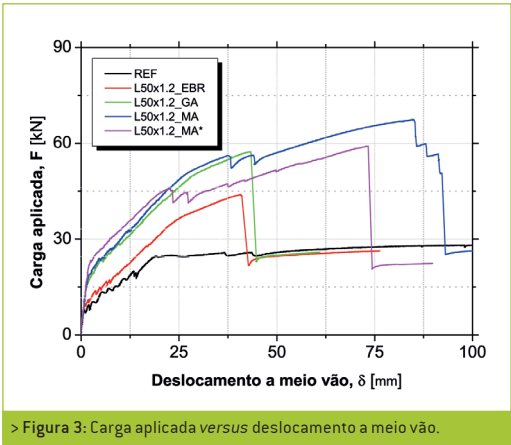
Este trabalho foi suportado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Portuguesa de Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. ■

### REFERÊNCIAS

[1] Pellegrino, C.; Sena-Cruz, J.M. (Editores) "Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC." RILEM State Art Reports, Vol. 19., ISBN: 978-94-017-7335-5, 2015.

[2] Michels, J.; Sena-Cruz, J.; Czaderski, C.; Motavalli, M. (2013) "Structural strengthening with prestressed CFRP strips with gradient anchorage." Composites for Construction, 17(5): 651–661.

[3] Michels, J.; Barros, J.; Costa, I.; Sena-Cruz, J.; Czaderski, C.; Giacomini, C.; Kotynia, R.; Lees, J.; Pellegrino, C.; Zile, E. (2015) "Prestressed FRP Systems" Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete, RILEM State-of-the-Art Reports 19, C. Pellegrino and J. Sena-Cruz (eds.), 263-301.



> Tabela 1: Principais resultados obtidos.

Laje	Início da fendilhação		Cedência da armadura		Resistência máxima		$\epsilon_{fmax}$	Modo de rotura
	$\delta_{cr}$	$F_{cr}$	$\delta_y$	$F_y$	$\delta_{max}$	$F_{max}$		
	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[10 <sup>-3</sup> ]	
REF	0.71	7.88	18.90	24.54	100.00 <sup>(a)</sup>	28.07 <sup>(b)</sup>	-	-
L50x1.2_EBR	0.68	8.49	25.87	37.05	40.69	43.98	7.56	D
L50x1.2_GA	1.55	16.16	29.04	50.20	43.31	57.38	11.58	D
L50x1.2_MA	1.82	17.87	26.88	50.58	84.78	67.46	14.76	F
L50x1.2_MA*	2.53	22.81	20.57	44.89	73.23	59.09	12.53	D

Notas:  $\delta$  = Deslocamento a meio vão;  $F$  = Força aplicada;  $\epsilon_{fmax}$  = Extensão máxima no laminado de CFRP; D = Destacamento; F = Rotura do laminado de CFRP.